RHV, 2024, No 25, 29-55 eISSN 0719-4242
DOI: https://doi.org/10.22370/rhv2024iss25pp29-55
Sección Monográfica / Monographic Section

Reducción interteórica en física: un enfoque pluralista[1]

Intertheoretical reduction in physics: a pluralistic approach

Patricia Palacios
University of Salzburg, Departamento de Filosofía, Austria
patricia.palacios@sbg.ac.at
https://orcid.org/0000-0002-7010-8979

Resumen

Presento y defiendo en este artículo un enfoque pluralista de la reducción interteórica. En este la reducción se entiende como una familia de modelos que pueden ayudar a alcanzar ciertos objetivos epistémicos y ontológicos. Sostendré entonces que el modelo reductivo (o la combinación de modelos) que mejor se adapte a un caso de estudio concreto dependerá de los objetivos específicos que motiven la reducción en ese caso.

Palabras clave: reduccionismo, modelos, pluralismo, física, interteórico.

Abstract

I present and defend in this paper a pluralistic approach to intertheoretical reduction. In this, reduction is understood as a family of models that can help to achieve certain epistemic and ontological goals. I will then argue that the reductive model (or combination of models) that is best suited to a particular case study will depend on the specific goals that motivate reduction in that case.

Keywords: reductionism, models, pluralism, physics, intertheoretical.

[1] Agradecemos a Felipe González Palacios y Braulio Abarcas Vidal por la traducción de la versión original inglesa de este manuscrito.

Received: 11/04/2024. Final version: 20/07/2024
eISSN 0719-4242 – © 2024 Instituto de Filosofía, Universidad de Valparaíso

1. Introducción

¿Bajo qué condiciones una teoría se reduce a otra y qué se consigue con la reducción? Es una pregunta importante en cuanto las reducciones interteóricas desempeñan un papel importante en la física moderna. Es famoso el intento de Nagel (1961) de ofrecer una estructura general de la reducción científica, en la que esta relación se entendía en términos de la deducción lógica de la teoría reducida a partir de la unión de la teoría reductora con las leyes puente. Sin embargo, este enfoque de la reducción resultó inadecuado para describir incluso los casos más paradigmáticos de reducción en física. A pesar de sus limitaciones, el modelo nageliano —y las versiones corregidas del mismo (p. ej., Dizadji-Bahmani, Frigg y Hartmann, 2010; Sarkar, 2015; Van Riel, 2011)— hoy en día sigue siendo considerado como el modelo filosófico estándar de reducción (Batterman, 2001) y ha sido considerado por algunos como la filosofía base de las iniciativas reductivas en física, como la reducción de la termodinámica a la mecánica estadística (Butterfield, 2011b; Dizadji-Bahmani *et al.*, 2010; Frigg, 2008).

En este artículo defenderé que, a pesar que las versiones corregidas del modelo nageliano pueden explicar realmente algunos casos de reducción en física, no bastan para explicar los ejemplos más importantes de reducción en física, incluida la supuesta reducción de la termodinámica a la mecánica estadística. Por lo tanto, sostendré que para comprender mejor la reducción es necesario considerar modelos alternativos de reducción que se centren en el papel de los límites y las aproximaciones, así como en la conexión estructural entre las teorías que se comparan.

En *Creative Understanding* (1990), Roberto Torretti ya distingue entre cinco modelos alternativos de reducción interteórica, señalando la importancia de cada uno de ellos. Aquí seguiré este enfoque pluralista de la reducción destacando los diferentes objetivos epistémicos y ontológicos que cumplen estos modelos de reducción. Argumentaré entonces que el modelo reductivo (o combinación de modelos) que mejor se adapte a un estudio de caso particular depende de los objetivos específicos que motivan la reducción en el estudio de caso pretendido.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: en la Sección 2, discutiré diferentes funciones epistémicas y ontológicas que la reducción desempeña en física. En la Sección 3, describiré las principales características del modelo nageliano y versiones corregidas del mismo, señalando sus virtudes y limitaciones. En la Sección 4, abordaré el modelo de reducción de Kemeny y Oppenheim y sostendré que el modelo puede explicar algunos casos de reducción (eliminativa) de una teoría por otra.

Sin embargo, argumentaré que el modelo tiene un alcance muy limitado, puesto que depende de una distinción tajante entre términos teóricos y observacionales y no impone ninguna relación estructural entre la teoría reducida y la reductora. En la Sección 5, analizaré el modelo de reducción de Schaffner, argumentando que este modelo puede dar cuenta de manera exitosa de casos en los que la teoría reducida es modificada por la teoría reductora. En la Sección 6, analizaré la distinción de Nickles entre la *reducción*$_1$ y *reducción*$_2$. Argumentaré que, aunque su propuesta constituye un paso adelante hacia un enfoque pluralista de la reducción; la distinción entre *reducción*$_1$ y *reducción*$_2$ es menos tajante de lo que él sugiere, ya que muchos casos de reducción en física combinan ambos modelos de reducción. En la Sección 8, analizaré el modelo estructuralista de reducción, haciendo hincapié en los roles epistémicos que cumple este modelo.

2. La reducción interteórica

Las reducciones interteóricas desempeñan un papel destacado en física, pero no siempre está claro qué se consigue con la reducción de una teoría a otra. Tradicionalmente, quizá debido a la influencia de Nagel (1949; 1961; 1970), se ha considerado que la reducción de una teoría T_2 a otra T_1 equivale a la explicación de T_2 mediante la teoría reductora T_1. Esta idea también está presente en algunas iniciativas reductoras de la física. Por ejemplo, Rudolf Clausius, uno de los primeros físicos en formular la Segunda Ley de la Termodinámica, creía que la teoría atómica podría ser útil para explicar por qué la entropía nunca disminuye en los sistemas aislados. Del mismo modo, Ludwig Boltzmann, el padre de la mecánica estadística, justificó sus propios intentos de conectar la Segunda Ley de la Termodinámica con la teoría atómica como una forma de dar una explicación de la Segunda Ley de la Termodinámica basada en la mecánica estadística. Como lo expresa en un artículo de 1866: “Es el propósito de este artículo dar una prueba puramente analítica y completamente general de la segunda ley de la termodinámica” (Klein, 1973, p. 57).

Sin embargo, creer que esa explicación es la única función epistémica de la reducción interteórica sería infravalorarla. De hecho, las reducciones interteóricas pueden servir a menudo para justificar el éxito de la teoría reducida. Esto es especialmente importante en los casos en los que la reducción de una teoría a otra no pretende eliminar la teoría reducida, sino más bien conservarla como instrumento útil para hacer predicciones. Por ejemplo, la reducción de la gravitación newtoniana a la relatividad general puede entenderse como una justificación de por qué la gravitación newtoniana tuvo tanto éxito en el pasado, al mismo tiempo, esta relación reductora puede utilizarse para justificar el uso posterior de la teoría newtoniana como una herramienta conveniente para hacer predicciones en casos en los que la velocidad del cuerpo es pequeña en comparación con la velocidad de la luz. Torretti (1990) señala que, para legitimar el uso de la teoría reducida, es necesario que exista una relación estructural entre la teoría reducida y la reductora, que asegure que la teoría reducida tendrá éxito en todos los casos relevantes. Como se verá en las secciones siguientes, este requisito impone una restricción importante a los modelos de reducción que serán adecuados para describir reducciones exitosas en física.

En general, son de interés las teorías reductoras que han sido bien establecidas en la comunidad científica y que tienen una existencia anterior a la construcción de la teoría reductora. Como señala Nickles (1973, p. 200), el éxito de la teoría reducida generalmente impone restricciones a las variables físicas y sus relaciones matemáticas en las posibles teorías sucesoras. Esto significa que la teoría reducida puede funcionar como una guía heurística en el desarrollo de la nueva teoría. Se puede considerar que el intento de reducir la Segunda Ley a la teoría cinética desempeñó un papel heurístico en la construcción de la mecánica estadística. De hecho, fue el intento de reducir la Segunda Ley lo que llevó a Boltzmann a considerar las funciones de distribución molecular en lugar del conjunto completo de variables y a establecer una estrecha conexión entre entropía y probabilidad.[2] También puede considerarse que la reducción de la teoría termodinámica de las transiciones de fase a la mecánica estadística desempeñó un papel heurístico en el desarrollo de un tratamiento mecánico estadístico de los fenómenos, que siguió el ejemplo de la termodinámica al definir las transiciones de fase en términos de discontinuidades en las derivadas de la energía libre.

Además de ayudar a la construcción de la teoría reductora, la reducción de una teoría a otra también puede desempeñar un papel en la *aceptación* o *consolidación* de la nueva teoría. Como ya se ha dicho, normalmente uno se interesa por las teorías reductoras que han hecho predicciones acertadas. La capacidad de la teoría reductora para recuperar esas predicciones y dar cuenta de la misma (o aproximadamente la misma) gama de fenómenos que fueron explicados con éxito por la teoría reducida puede llevar entonces a la consolidación de la teoría reductora. Un buen ejemplo de ello es la reducción de la teoría óptica de la luz a la teoría del electromagnetismo de Maxwell. Según la teoría óptica del siglo XVIII, la luz estaba formada por partículas materiales.

Esta teoría, que más tarde fue sustituida por la teoría electromagnética, podía explicar con éxito una amplia gama de fenómenos como la reflexión simple, la refracción y la dispersión prismática. La recuperación de estas predicciones mediante la nueva teoría electromagnética de la luz, de acuerdo con la cual ésta consiste en una serie de cambios ondulatorios en un campo electromagnético incorpóreo, condujo finalmente a la aceptación de la teoría de Maxwell.[3]

Dado que la recuperación de las predicciones de la teoría reducida por parte de la teoría reductora puede desempeñar un papel en la aceptación de la teoría reductora, la incapacidad de recuperar esas predicciones también puede frustrar las reducciones interteóricas. Por ejemplo, en la época en que Boltzmann intentaba deducir la Segunda Ley a partir de una teoría microscópica, la hipótesis atómica no estaba bien establecida en la física, ya que muchos físicos, bajo la influencia de la filosofía positivista, eran reacios a aceptarla, en el sentido de

[2] Consulte Blackmore (1995) y Brush (2006) para un análisis histórico sobre el papel heurístico desempeñado por el intento de reducir la Segunda Ley en el desarrollo de la mecánica estadística.

[3] Había algunas predicciones de la teoría electromagnética que eran incompatibles con las predicciones de la óptica física tradicional, como el decaimiento exponencial de la penetración de las ondas electromagnéticas en la superficie de un objeto opaco reflectante. Sin embargo, estas incoherencias se resolvieron rápidamente a favor de una modificación de la teoría reducida. La versión modificada de la óptica tradicional se consideró totalmente reducible a la teoría electromagnética y esta reducción condujo finalmente a la aceptación de esta última teoría (Worrall, 1989, p. 148).

que postulaba la existencia de entidades demasiado pequeñas para ser observadas (Blackmore, 1995). La reducción de la Segunda Ley a la mecánica estadística se consideró entonces una estrategia para aumentar la confianza en esta última teoría. Desgraciadamente, diferentes objeciones señalaban contradicciones manifiestas entre la Segunda Ley y la teoría de Boltzmann retrasaron la aceptación de esta última. Una de estas objeciones fue propuesta por Loschmidt (1876), quien demostró que existía una contradicción entre una de las premisas básicas de la teoría de Boltzmann, es decir, la reversibilidad de todos los movimientos puramente mecánicos, y la Segunda Ley, que implica un aumento irreversible de la entropía. Otra objeción se debió a Poincaré (1889) y Zermelo (1896), quienes demostraron que cualquier sistema mecánico restringido a moverse en un volumen finito y con una energía total fija acabará volviendo a las condiciones iniciales especificadas. Esto significa que, en principio, el sistema puede evolucionar hacia un estado de menor entropía, lo que es incompatible con la Segunda Ley. Dado que la Segunda Ley era ampliamente aceptada en la comunidad de físicos, la aparente incompatibilidad entre esta ley y la mecánica estadística llevó a la mayoría de los físicos a pensar que esta última era falsa (Blackmore, 1995; Brush, 2006). De hecho, a pesar de los intentos de Boltzmann para socavar estas objeciones argumentando que el punto de vista mecánico no tenía ninguna consecuencia en desacuerdo con la experiencia, la aceptación de la teoría atómica y de la mecánica estadística tuvo que esperar hasta el siglo XX. Sólo después de que la mecánica estadística fuera aceptada dentro de la comunidad de físicos, el intento de reducir la Segunda Ley de la termodinámica condujo al desarrollo de varios enfoques que intentaban *corregir* la teoría reducida. Por ejemplo, enfoques en los que la versión estricta original de la Segunda Ley de la termodinámica se modificó para permitir fluctuaciones de entropía en el equilibrio (p. ej., Dauxois *et al.*, 2002; Einstein, 1910; Greene y Callen, 1951). El objetivo principal de estos enfoques reductores ya no era consolidar la teoría reductora, sino corregir la teoría reducida de acuerdo con la teoría reductora.

Aparte de las funciones epistémicas antes mencionadas, la reducción también pretende apoyar la *fundamentalidad* relativa de la teoría reductora con respecto a la teoría reducida. La fundamentalidad es una función crucial de la reducción, ya que puede explicar su carácter asimétrico. En términos generales, la fundamentalidad puede entenderse en el sentido de que la teoría reductora tiene alguna "ventaja" sobre la teoría reducida o es "mejor" que ésta. En la literatura filosófica, se pueden distinguir al menos cuatro formas diferentes en las que se dice que una teoría T_1 es más fundamental que otra T_2. i) Poder empírico: T_1 da cuenta de todas las observaciones dentro del ámbito de T_2 y de nuevas observaciones fuera del ámbito de T_2, ii) Virtudes estéticas: T_1 es "más simple", "más elegante" o más "sistematizada" que T_2, iii) Corrección empírica: T_1 es empíricamente más correcto que T_2, iv) Supremacía ontológica: T_1 tiene la ontología correcta o, al menos, una ontología más cercana a la verdad que la ontología de T_2. Permítanme subrayar que, aunque todas las reducciones son asimétricas con respecto a la fundamentalidad, no todas las reducciones pretenden demostrar la fundamentalidad en el mismo sentido. Esto quedará claro en el análisis de los diferentes modelos de reducción interteórica que se desarrollan en el resto del artículo.

Hasta ahora, centrándonos en unos pocos ejemplos, hemos distinguido entre seis diferentes objetivos de la reducción: *explicación*, *justificación* y *corrección* de la teoría reducida, así como *desarrollo*, *consolidació*n y *fundamentación* de la teoría reductora. Sin embargo, cuanto más se examinan los diferentes estudios de casos considerados (a veces polémicamente) como reducciones exitosas en física, más objetivos epistémicos y ontológicos se encuentran. El objetivo de este artículo no es hacer una descripción exhaustiva de todas las funciones que pueden desempeñar las reducciones en física, sino más bien centrarse en un subconjunto de ellas que son particularmente importantes para los ejemplos que serán considerados.

3. El modelo nageliano

Ahora que hemos mencionado algunos objetivos epistémicos y ontológicos importantes de la reducción interteórica, surgen diferentes cuestiones de interés filosófico. Por ejemplo, ¿cuáles son las características más importantes de las reducciones exitosas en física? ¿Cuál es la estructura (lógica) que caracteriza a las reducciones interteóricas en física? ¿Cuáles son las condiciones necesarias y suficientes para el éxito de las reducciones en física?

En 1949, Nagel argumentó que todas estas preguntas tienen una respuesta única asociada a la estructura formal de las reducciones interteóricas. Estas ideas se desarrollaron posteriormente en su libro de 1961 *La estructura de la ciencia*. Para Nagel, existe una forma general de caracterizar los componentes principales y la estructura lógica de los distintos tipos de reducción en la ciencia. Según este punto de vista, toda reducción puede construirse como una serie de enunciados, en los que uno de ellos, es decir, la teoría reducida, es la conclusión, mientras que los demás, la teoría reductora y los supuestos auxiliares, son las premisas. En el caso de las reducciones homogéneas, en las que todos los términos de materia específica de la teoría reducida T_2 están presentes en la teoría reductora T_1, la estructura formal es directamente la de un argumento deductivo. En el caso de las reducciones no homogéneas, en las que al menos un término descriptivo de la teoría reducida no aparece en la teoría reductora, es necesario complementar la teoría reductora con "reglas de correspondencia" o "leyes puente" (*BL*), que establecen conexiones entre los términos distintivos de la teoría reductora y los términos de la teoría reducida. Una vez que la teoría reductora se ha complementado adecuadamente con leyes puente, la reducción no homogénea, al igual que las reducciones homogéneas, encarna el patrón de los argumentos deductivos.[4]

En consecuencia, según este punto de vista, hay dos propiedades principales que sirven para dar una caracterización general de las reducciones en ciencia:

[4] Esta idea también puede expresarse en términos de extensión definitoria de una teoría. La idea central de la reducción nageliana es que una teoría T_1 reduce a otra T_2, solo si T_2 puede definirse como una extensión definitoria de T_1, lo que significa que puede demostrarse que T_2 es una subteoría de la teoría aumentada $\mathrm{T}_1 \cup BL$ (Butterfield, 2011a).

- Derivabilidad: Las leyes de la teoría reducida pueden derivarse lógicamente de las leyes de la teoría reductora (aumentada) más los supuestos auxiliares.
- Conectabilidad: En el caso de reducciones no homogéneas, existen leyes puente, que conectan el vocabulario de la teoría reductora con el vocabulario de la teoría reducida.

Nagel (1961) también señaló que si la reducción no es trivial, las leyes puente deben constituir hipótesis científicas, que deben ser susceptibles de confirmación o desconfirmación empírica.[5]

Esta caracterización general de las reducciones interteóricas en términos de deducción lógica tiene importantes virtudes si pensamos en los objetivos de la reducción interteórica mencionados en la sección anterior. De hecho, la mayor ventaja de entender la reducción en términos de deducción lógica es que la deducción lógica preserva la verdad. Esto significa que si T_1 y BL, así como los supuestos auxiliares, son todos verdaderos, entonces la teoría reducida también debe ser verdadera. En otras palabras, si aceptamos la validez de la nueva teoría T_1, entonces sobre la base de la relación lógica entre $T_1 \cup BL$ y T_2, estamos obligados a aceptar la validez de T_2 bajo ciertos supuestos auxiliares. Directamente, esto conduce a la justificación del uso de T_2 como un dispositivo útil para hacer predicciones y también puede conducir a explicar el éxito de T_2 desde la perspectiva de T_1. Además, dado que en la mayoría de los casos, la teoría reducida T_2 ha demostrado ser empíricamente exitosa, mostrar que T_2 es una consecuencia lógica de la teoría aumentada $T_1 \cup BL$, implica que, en la teoría aumentada, uno puede recuperar todas las predicciones exitosas de T_2. Uno puede entonces usar esta relación estructural entre T_2 y la teoría aumentada $T_1 \cup BL$ como argumento para la consolidación o aceptación de la nueva teoría T_1, que en general reemplaza a la vieja teoría T_2. Además, la reducción entendida en términos de deducción lógica puede desempeñar un papel heurístico en el desarrollo de la teoría reductora. En efecto, saber que el objetivo es derivar la teoría T_2 a partir de la nueva teoría T_1 puede conducir a la construcción de leyes puente y supuestos auxiliares adecuados que ayuden a derivar la teoría original T_2. Por último, las reducciones nagelianas estrictas también pueden servir para apoyar la fundamentalidad relativa de T_1 sobre T_2. En efecto, si T_2 es una consecuencia lógica de la teoría aumentada $T_1 \cup BL$, y lo contrario no se cumple, entonces $T_1 \cup BL$ puede considerarse más general que T_2.

A pesar de sus ventajas, el modelo nageliano de reducción ha sido cuestionado por varios filósofos. Una de las críticas más importantes es que, incluso en los casos más paradigmáticos de reducción en la ciencia, la teoría reducida no se deriva estrictamente de la teoría reductora más las leyes puente (Feyerabend, 1962; Sklar, 1967; Schaffner, 1967; 2012).[6] Consideremos

[5] Consulte Nagel (1970), Dizadji-Bahmani *et al.* (2010), Schaffner (2012) para un debate detallado sobre la situación de las leyes puente.

[6] Feyerabend (1962) criticó duramente el modelo señalando cuestiones polémicas asociadas no sólo a la condición de derivabilidad, sino también a la condición de conectabilidad. Su crítica a la condición de conectabilidad procedía de su "tesis de la inconmensurabilidad", según la cual, todo el vocabulario científico, incluidos los términos observacionales, están globalmente infectados por la teoría en la que funcionan. Nagel

el ejemplo de la reducción de la ley galileana de un cuerpo que cae libremente a la teoría newtoniana considerada por Nagel (1961) como un caso paradigmático de reducción homogénea. Se ha señalado a menudo (p. ej., Schaffner, 1967; Sklar, 1967; Torretti, 1990) que incluso en este caso, la teoría reducida no puede derivarse de la teoría reductora, ya que las dos teorías son estrictamente hablando "inconsistentes". De hecho, mientras que la ley de Galileo afirma que la aceleración de un cuerpo que cae libremente cerca de la superficie terrestre es constante, la teoría newtoniana implica que la aceleración varía con la distancia del cuerpo que cae al centro de masa terrestre. Esto significa que, como mucho, lo que se puede derivar de la teoría reductora es una aproximación a la teoría reducida y no la teoría reducida en sí.

En 1970, Nagel reconoció explícitamente el uso de aproximaciones en las reducciones interteóricas. Sin embargo, argumentó que las aproximaciones no eran incompatibles con su modelo, ya que pueden participar en los supuestos auxiliares necesarios para derivar la teoría reducida:

> En términos más generales, aunque no se dispone de datos estadísticos que apoyen esta afirmación, hay relativamente pocas deducciones de las teorías de la física moderna formuladas matemáticamente en las que no se hagan aproximaciones análogas, de modo que muchas, sino todas las leyes que los científicos suelen decir que son deducibles de alguna teoría no están estrictamente implícitas en ella. No obstante, sería exagerado afirmar que, en consecuencia, los científicos se equivocan fundamentalmente al afirmar que han hecho tales deducciones. Evidentemente, es importante tener en cuenta los supuestos, incluidos los relativos a las aproximaciones, bajo los cuales se realiza la deducción de una ley. (Nagel, 1970, p. 363)

Es importante señalar, sin embargo, que, si la teoría reducida T_2 sólo puede deducirse aproximativamente de la teoría reductora T_1, entonces la teoría reducida T_2 ya no puede considerarse incluida en T_1, puesto que T_1 y T_2 difieren. Esto tiene importantes consecuencias para las funciones epistémicas que pueden cumplir las reducciones nagelianas aproximativas. De hecho, si T_2 no puede derivarse de T_1, no se puede justificar el éxito empírico de T_2 sólo sobre la base de su relación lógica con T_1. A primera vista, esto no es tan problemático, ya que el modelo nageliano otorga un papel destacado a los supuestos auxiliares. De hecho, según este modelo, T_2 no se deduce sólo de T_1, sino de T_1 y los supuestos auxiliares, y en el caso de las reducciones no homogéneas, de T_1, BL y los supuestos auxiliares. Si los supuestos auxiliares son ciertos, y la teoría reductora es correcta, entonces podemos inferir la exactitud (aproximada) de la teoría reducida bajo ciertas condiciones. Por ejemplo, en la reducción de la ley de caída libre de Galileo a la mecánica newtoniana, si se supone que la distancia recorrida por el cuerpo que cae desde su posición inicial hasta la superficie de la tierra es muy pequeña comparada con el radio de la tierra, entonces podemos suponer, por una buena

(1970) respondió a estas objeciones con una crítica incisiva a la tesis de la inconmensurabilidad.

aproximación, que la aceleración toma un valor constante. Bajo estas suposiciones podemos derivar efectivamente la ley de Galileo de la caída libre y justificar su éxito cuando la distancia recorrida por el cuerpo en caída libre es pequeña comparada con el radio de la tierra.

Sin embargo, existen diferencias importantes entre las reducciones aproximativas y las estrictas. En primer lugar, las reducciones aproximativas, a diferencia de las estrictas, dependen en gran medida de supuestos auxiliares que implican aproximaciones. Si estos supuestos auxiliares son falsos o no constituyen buenas aproximaciones, no se puede justificar ni garantizar el éxito de la teoría secundaria. En segundo lugar, las reducciones aproximativas sólo implican la precisión aproximativa de la teoría secundaria. Esto significa que siempre existe el riesgo de que la teoría secundaria conduzca a resultados inexactos.

Dadas estas diferencias, uno puede sentirse tentado a considerar las reducciones nagelianas estrictas y las reducciones nagelianas aproximativas como dos modelos diferentes de reducción. Sklar (1967) considera incluso la posibilidad de restringir el término “reducción” a los casos de reducción estricta. Sin embargo, como el propio Sklar reconoce, hay casos importantes de reducción en física, que constituyen reducciones aproximativas, por lo que restringir el término “reducción” a casos de reducción estricta no encajaría con la práctica científica. La motivación de Nagel (1961; 1970) para considerar que los dos casos encajan en el mismo modelo de reducción es que ambos tipos de reducción tienen la misma estructura. Esto significa que tanto las reducciones nagelianas aproximativas como las reducciones estrictas pueden construirse como un argumento deductivo en el que la teoría reducida se deriva de la teoría reductora más las leyes puente y los supuestos auxiliares. La principal diferencia entre las reducciones estrictas y las reducciones aproximativas es, según Nagel, que estas últimas requieren supuestos auxiliares que implican aproximaciones. Aunque creo que es conveniente distinguir entre estos dos tipos de reducción, seguiré a Nagel al suponer que, puesto que tienen aproximadamente la misma estructura, debe considerarse que encajan en el mismo modelo de reducción. En lo que no estoy de acuerdo con Nagel es en que todas las reducciones aproximativas sean del mismo tipo. De hecho, hay casos de reducciones aproximativas que pueden construirse como argumentos deductivos en los que la teoría reducida se sigue de las premisas, como la reducción de la ley de Galileo de la caída libre de los cuerpos a las leyes de la mecánica newtoniana comentada anteriormente. Sin embargo, hay muchos casos de reducciones aproximativas en física, incluida la reducción de la Segunda Ley, en los que la teoría reducida no se deduce de la teoría reductora y los supuestos auxiliares. Por ejemplo, hay casos en los que la teoría que puede derivarse de la teoría reductora y los supuestos auxiliares no es la teoría reducida original, sino una versión análoga de la teoría reducida. En la Sección 5, argumentaré que el modelo de Schaffner describe mejor estos casos. Sin embargo, hay otros casos de reducciones aproximativas que no pueden plantearse convenientemente en términos de argumentos deductivos. Discutiré estos casos en las secciones 7 y 8.

4. El modelo de Kemeny y Oppenheim

Para ofrecer una solución a los problemas relacionados con la condición de derivabilidad en el modelo de Nagel, Kemeny y Oppenheim (1956) sugirieron un modelo general alternativo de reducción, en el que renuncian a la idea de vincular las estructuras de la teoría reducida y la reductora. En este modelo, la reducción interteórica se define indirectamente en relación con un conjunto de datos observacionales. El modelo propone que una teoría T_2 se reduce por medio de T_1 en relación con los datos observacionales O, si y solo si (i) el vocabulario de T_2 contiene términos que no forman parte del vocabulario de T_1, (ii) cualquier parte de O explicable por medio de T_2 es explicable por T_1, y (iii) T_1 tiene un poder sistemático mayor que T_2, lo que significa que T_1 tiene la capacidad de predecir la mayor variedad posible de fenómenos a partir de la menor cantidad posible de datos.

El principal problema de este modelo es que parece demasiado débil para dar cuenta de muchos casos de reducción en la ciencia. La debilidad de este modelo se debe a que no impone ninguna relación estructural entre T_1 y T_2.

De hecho, sólo requiere que las dos teorías hagan las mismas predicciones observacionales dentro del rango de fenómenos cubiertos por T_2. El problema es que, sin plantear un vínculo estructural entre T_1 y T_2, la reducción no permite justificar el éxito de T_2 sobre la base de T_1. Esto significa que no se puede utilizar la reducción de T_2 a T_1 para justificar el uso de T_2 en determinadas condiciones. Además, sin una relación estructural entre T_1 y T_2, no se puede explicar T_2 en base a T_1 y no se puede argumentar a favor de la fundamentalidad ontológica de T_1 sobre T_2. Parece, por tanto, que los únicos objetivos epistémicos del modelo de Kemeny y Oppenheim son ayudar a consolidar T_1, mostrando que esta nueva teoría hace las mismas predicciones (o similares) que la teoría previa T_2, y apoyar la fundamentalidad relativa de T_1 sobre T_2 en el sentido epistémico de que T_1 tiene mayor poder sistemático que T_2. Los casos de "reducción" que sólo conducen a la consolidación de la teoría reductora son casos en los que la teoría reducida es de hecho sustituida por la teoría reductora y la teoría reducida es derrocada. Un ejemplo es la reducción de la teoría del flogisto por la teoría del oxígeno de la combustión o de la teoría calórica por la teoría energética del calor.

De lo dicho anteriormente se desprende que, si el modelo de Kemeny y Oppenheim ha de dar cuenta de algunas reducciones en física, éstas han de ser casos de sustitución total de una teoría por otra. Sklar (1967) sugiere, sin embargo, que el modelo de Kemeny y Oppenheim ni siquiera es capaz de dar cuenta de tales casos, ya que requiere una distinción tajante entre términos observacionales y teóricos, que ha sido rechazada por la mayoría de los filósofos de la ciencia, y requiere que dos teorías predigan los mismos resultados observacionales dentro del ámbito de T_2, lo que casi nunca se cumple. Dejando de lado el problema de la distinción teórico/observacional, creo que una versión corregida del modelo de Kemeny y Oppenheim que sólo requiere que las dos teorías hagan predicciones similares para un conjunto relevante de observables, puede ser lo suficientemente débil como para dar cuenta de casos históricos de *reducciones eliminativas*, que tienen el único propósito de consolidar la nueva teoría apoyando una fundamentalidad epistémica relativa de la teoría reductora sobre la teoría reducida. La sustitución de la teoría del movimiento planetario de Ptolomeo por la teoría de Copérnico puede considerarse un ejemplo paradigmático de este tipo de reducción. Ahora bien, se puede objetar que los casos de sustitución total, en los que la teoría anterior es derrocada, no merecen en absoluto el nombre de "reducciones" (Sklar, 1967). Aunque no tengo una opinión firme sobre esta cuestión, creo que es conveniente llamarlas *reducciones eliminativas*, porque cumplen al menos dos de los objetivos más importantes de la reducción interteórica, a saber, la consolidación de la nueva teoría y el apoyo de una fundamentalidad relativa de una teoría sobre otra en el sentido de poder sistemático.

5. El modelo de Nagel-Schaffner

Schaffner (1967) tomó un camino diferente al de Kemeny y Oppenheim y propuso un modelo de reducción directa que se suponía que daba una caracterización más general de las reducciones interteóricas que el modelo nageliano. Este modelo dice que la reducción ocurre *si y sólo si*:

1. Todos los términos primitivos $q_1, \ldots, q_n$ que aparecen en la teoría reducida *corregida* $T_2{}^*$ aparecen en la teoría reductora T_1 (en el caso de reducciones homogéneas) o están asociados a uno o varios términos de T_1 con la ayuda de funciones de reducción, es decir, leyes puente.
2. $T_2{}^*$ es derivable de T_1, cuando T_1 está unido a leyes puente.
3. $T_2{}^*$ corrige a T_2 en el sentido de que proporciona predicciones verificables experimentalmente más precisas que T_2 en casi todos los casos, y también debería indicar por qué T_2 era incorrecto (por ejemplo, se ignoran variables cruciales), y por qué funcionó tan bien como lo hizo.
4. T_2 debe ser explicable por T_1 en el sentido de que T_1 produce $T_2{}^*$ como consecuencia deductiva.
5. Las relaciones entre T_2 y $T_2{}^*$ deben ser de *analogía fuerte*, lo que significa que $T_2{}^*$ se parece mucho a T_2 o produce predicciones numéricas predicciones numéricas "muy parecidas" a las de T_2.

Schaffner sostiene que este modelo debe considerarse un "paradigma general de reducción" de las reducciones interteóricas en la ciencia y trata de demostrar que otros enfoques de la reducción, como el modelo de Nagel y el modelo de Kemeny y Oppenheim, no son más que casos especiales de este modelo generalizado.[7]

Un punto de vista similar ha sido defendido recientemente por Dizadji-Bahmani *et al.* (2010), quienes sostienen que una versión ligeramente corregida de este modelo, la que

[7] En 1977 y 2012 reitera esta idea proponiendo un modelo aún más general, al que bautizó como "El modelo general de sustitución de la reducción". Este modelo se suponía lo suficientemente general como para tener como caso límite "el paradigma de reducción", que por su parte arroja como caso límite el modelo de Nagel.

denominaron "Modelo Generalizado de Nagel-Schaffner" (GNS), nos proporciona el análisis correcto de las reducciones interteóricas. En otras palabras, "nos cuenta la historia correcta sobre cómo funciona la reducción interteórica sincrónica" (p. 393).[8] Una diferencia importante entre el modelo GNS y la propuesta original de Schaffner es que el modelo GNS (al igual que el modelo de Nagel) hace hincapié en el papel de las hipótesis auxiliares, que no parecen desempeñar ningún papel en la formulación original del modelo de Schaffner. Según el modelo GNS, la reducción es la subsunción deductiva de una versión corregida de T_2, es decir, T_2*, bajo T_1, donde la deducción implica (i) derivar primero una versión restringida, T_1*, de la teoría reductora T_1 introduciendo condiciones de contorno e hipótesis auxiliares y luego (ii) utilizar leyes puente para obtener T_2* (Dizadji-Bahmani *et al.*, 2010, p. 398).

Al igual que el modelo nageliano, el modelo de Schaffner ha sido objeto de varias críticas. Una de estas críticas es que se basa en una visión sintáctica de las teorías (Suppe, 1974). Otra es que el estatus de las leyes puente no está claro (Sklar, 1995). Un tercer problema es que las leyes puente son incompatibles con la realizabilidad múltiple (Kitcher, 1984). El cuarto problema es que el hecho de que no haya restricciones para los supuestos auxiliares hace que este modelo sea demasiado liberal. Por último, se ha señalado que el significado de analogía fuerte es demasiado vago para permitirnos dar una caracterización precisa de la reducción. Dizadji-Bahmani *et al.* (2010) abordaron todos estos problemas y ofrecieron una respuesta convincente a cada uno de ellos. No voy a discutir estos problemas aquí, sino que me centraré en un problema diferente, que no fue abordado por ellos, a saber, la generalidad del modelo.

Como lo veo, la mayor ventaja del modelo de Schaffner, o del modelo GNS, es que puede dar cuenta correctamente de aquellos casos de reducción en los que la teoría que se deduce de la teoría reductora T_1 más los supuestos auxiliares y las leyes puente no es la teoría secundaria original T_2, sino una versión *corregida* de la teoría, es decir, T_2*. La modificación de Sommerfeld de la óptica física según la teoría electromagnética de Maxwell puede considerarse como un caso paradigmático de este tipo de reducción (Schaffner, 1967; 2012). Basándose en las ecuaciones de Maxwell, Sommerfeld modificó las famosas leyes del seno y la tangente de Fresnel para la relación de las amplitudes relativas de la luz polarizada incidente, reflejada y refractada. Esta versión modificada de las leyes de Fresnel es una aproximación o analogía cercana de las leyes originales de la óptica física, en el sentido de que produce predicciones muy cercanas a las predicciones de la óptica física.[9]

[8] Dizadji-Bahmani *et al.* (2010) restringen su análisis a las denominadas reducciones sincrónicas interteóricas, que definen como "la relación reductiva entre pares de teorías que tienen los mismos ámbitos de aplicación (o que se solapan en gran medida) y que son válidas simultáneamente para varias extensiones" (p. 394). Sin embargo, es importante señalar que Schaffner (1977; 2012) no restringió su análisis a este tipo de reducción. De hecho, el caso paradigmático de reducción que presenta es la reducción de la óptica física a la teoría electromagnética, que debería considerarse mejor como una "reducción diacrónica", en la que una teoría sustituye históricamente a la otra.

[9] Consulte Schaffner (2012) y Worrall (1989) para un análisis detallado de esta reducción.

Se puede ver entonces que la reducción de Schaffner conduce crucialmente a la corrección de T_2 por T_1. De ello se deduce que T_1 es más fundamental que T_2, en el sentido de que T_1 es empíricamente más correcta que T_2. Sin embargo, es importante señalar que este tipo de reducción no suele conducir a la aceptación de T_1. De hecho, en general, las reducciones que pretenden modificar la teoría reducida de acuerdo con la teoría reductora se basan en teorías reductoras que han sido previamente aceptadas en la comunidad de físicos.

Aunque Schaffner (1967) cree que su modelo converge hacia el modelo nageliano cuando T_2 y T_2* son idénticos, creo que es importante mantener separados estos dos modelos, no sólo porque tienen estructuras diferentes, sino también porque cumplen funciones epistémicas distintas. La diferencia estructural entre el modelo nageliano y el modelo de Schaffner es significativa: en el primer caso, la teoría que se puede derivar a partir de supuestos auxiliares y leyes puente es la teoría original T_2, mientras que en el segundo se deriva una teoría diferente T_2*, que solo es fuertemente análoga a la original. Curiosamente, en algunos ejemplos de reducción en física, los físicos tienen la opción de "reforzar" los supuestos auxiliares para derivar la teoría original T_2 o de "debilitar" estos supuestos para derivar una teoría T_2* que modifique o corrija T_2. Un ejemplo de ello es la Segunda Ley de la termodinámica, que establece que la entropía de un sistema aislado no puede disminuir. Sin recurrir al límite termodinámico en el que el número de partículas llega al infinito, lo mejor que se puede hacer en mecánica estadística es plantear una teoría análoga que permita la posibilidad de fluctuaciones estadísticas, que pueden causar disminuciones temporales de la entropía. Hay enfoques importantes que intentan desarrollar una forma generalizada de termodinámica que incorpore las fluctuaciones de los parámetros termodinámicos en torno al equilibrio (p. ej. Callen y Kestin, 1960; Einstein, 1910; Mishin, 2015; Tisza y Quay, 1963). El objetivo de estos enfoques es precisamente ampliar el alcance de la termodinámica mediante la introducción de elementos estadísticos, que pueden aplicarse a casos en los que no pueden ignorarse las fluctuaciones, como los sistemas a escala nanométrica. Dado que en estos enfoques existe una teoría T_2* que modifica T_2 (formulación original de la Segunda Ley), se han considerado casos exitosos de reducción de Schaffner (Dizadji-Bahmani *et al.*, 2010; Callender, 2011).[10]

Es importante señalar, sin embargo, que, si se toma el límite termodinámico, entonces las fluctuaciones estadísticas se vuelven insignificantes. Esto se debe a que las fluctuaciones relativas de un observable macroscópico A en fases puras de un sistema extensivo desaparecen en el gran límite *N* (Gross, 2001a):

$$\frac{\langle A^2\rangle - \langle A\rangle^2}{\langle A\rangle^2} \propto \frac{1}{N}. \tag{1}$$

[10] Aún no está claro si se trata de un caso de reducción de Schaffner. De hecho, para demostrar que se trata de hecho de un caso de reducción de Schaffner, habría que demostrar que la teoría T_2* puede derivarse realmente de la mecánica estadística T_1. Esto no es fácil de demostrar, ya que al menos algunos de estos enfoques (Tisza y Quay, 1963) parecen constituir una amalgama de mecánica estadística y termodinámica, en lugar de una derivación de una alternativa termodinámica a partir de la mecánica estadística.

Esto significa que, si se toma el límite termodinámico, en principio se puede derivar exactamente la segunda ley bajo ciertos supuestos. Además, en el límite termodinámico, la objeción de Zermelo queda desvirtuada, ya que el tiempo de recurrencia es mucho mayor que cualquier tiempo de observación (Gross, 2001a; Rau, 2017).

Mi argumento es que la elección de supuestos auxiliares determina el modelo de reducción adecuado, y esto a su vez depende de los objetivos específicos de la reducción prevista y el caso de estudio bajo de investigación. Por ejemplo, si el objetivo principal es recuperar las predicciones exactas de las teorías secundarias, por ejemplo, para consolidar la teoría reductora, que no ha sido bien establecida en la comunidad científica, entonces se pueden "reforzar" los supuestos para derivar la teoría original T_2. El uso de Boltzmann del límite termodinámico y otras idealizaciones, tales como la llamada Boltzmann-Grad, pueden haber tenido este propósito (p. ej., Boltzmann, 1877; 1885). Sin embargo, si la teoría reductora ha sido consolidada y el objetivo principal de la reducción prevista es corregir la teoría reducida de acuerdo a la teoría reductora, por ejemplo, para derivar a una teoría que haga más predicciones acertadas, entonces se tenderá a "debilitar" los supuestos auxiliares y trata de derivar una teoría T_2^* que sea solo análoga a la original T_2. Además de los enfoques finitos mencionados antes, hay aproximaciones interesantes a la mecánica estadística que pretenden explicar sistemas no extensivos sin tener en cuenta el límite termodinámico. La motivación de tales aproximaciones es que en los sistemas no extensivos, tales como sistemas pequeños y los sistemas que interactúan a gran distancia, las fluctuaciones deben ser tomadas en serio (Gross, 2002).

Otro ejemplo que ilustra que la elección de supuestos auxiliares puede dirigir a perseguir diferentes modelos de reducción; es el caso de las transiciones de fase, que discutiré más detalladamente en la siguiente sección. En termodinámica, las transiciones de fase de primer orden se definen en términos de discontinuidades en las primeras derivadas de la energía libre. Para recuperar esta teoría de transiciones de fase de la mecánica estadística, y también para recuperar las mismas predicciones de la termodinámica, los enfoques más importantes se acogen al límite termodinámico, por medio del que el número de partículas y el volumen del sistema van hacia el infinito. Esta reducción se ha dirigido a la consolidación de la teoría mecánica estadística de las transiciones de fase más que a la modificación del tratamiento termodinámico. Sin embargo, hay varios intentos de desarrollar una teoría finita de transiciones de fase sin recurrir al límite termodinámico, los que han sido motivados principalmente por el hecho de que, en algunos casos particulares, el límite termodinámico no tiene sentido o es una mala aproximación. Este es, por ejemplo, el caso de sistemas "pequeños" o no extensivos, donde la dimensión lineal es del rango característico de la interacción entre partículas. Gross (2001b), Casetti y Kastner (2006) han desarrollado una teoría topológica de transiciones de fase sin usar el límite termodinámico, en la que las transiciones de fase son determinadas enteramente por peculiaridades topológicas. En un sentido importante, esta teoría puede ser considerada como corregidora de la teoría termodinámica de las transiciones de fase, mediante la oferta de una definición alternativa de las transiciones de fase que se puede aplicar a sistemas no extensivos. No obstante, sigue siendo controversial si la teoría mecánica estadística de las transiciones de fase que involucra el límite termodinámico debe ser reemplazada enteramente por una teoría finita de transiciones de fase. Uno de los argumentos en contra de este reemplazo es que, en la mayoría de los casos, el límite termodinámico hace que los cálculos sean más tratables. Otro argumento es que, en muchos casos, el límite termodinámico permite remover detalles irrelevantes, como los efectos finitarios, y esto nos permite dar una definición rigurosa de las transiciones de fase. Finalmente, está la observación empírica de que, en muchos casos, la teoría termodinámica de las transiciones de fase funciona perfectamente (Mainwood, 2006; Palacios, 2019).

El punto que quiero desarrollar aquí es que ninguno de los modelos de reducción discutidos explica mejor que otro la "esencia" o "la estructura general" de reducción, ni puede formularse uno en términos de otro. Estos son dos modelos diferentes de reducción y si hay reducción a la Nagel, reducción a la Schaffner, u otro tipo de reducción depende, como hemos visto, del caso de estudio previsto y los objetivos de la reducción en particular. También quiero destacar que parece haber un equilibrio entre el objetivo de "consolidar" la teoría reductora y "corregir" la teoría reducida. De hecho, si la teoría reductora no ha sido bien establecida en la comunidad científica aún, derivar una teoría que difiere de la teoría secundaria original T_2 con respecto a los fenómenos que están bien descritos por esta última teoría, puede llevar al rechazo de la teoría nueva. Por lo tanto, en esta fase, los científicos pueden tender a fortalecer los supuestos para derivar la teoría secundaria original T_2. El intento de reducir la Segunda ley de la termodinámica mediante el límite termodinámico puede ser considerado como un ejemplo destacado de esto. Sin embargo, una vez la teoría T_1 ha sido consolidada, el propósito principal de la reducción puede ser corregir la teoría T_2 según T_1, por ejemplo, para construir una teoría T_2^* que haga predicciones más acertadas. En esta instancia, los científicos pueden intentar conseguir una reducción a la Schaffner.

Finalmente, también es importante señalar que la reducción de Schaffner requiere la existencia de una teoría T_2^* que sea análoga a T_2 y que se derive desde T_1. A veces, especialmente en casos de sustitución de teorías, esta teoría no existe o, si existe, no pueden derivarse desde T_1 mediante leyes puente y supuestos auxiliares. Si la teoría modificada no existe, pero podemos derivar la teoría original bajo supuestos específicos que restringen el rango de aplicación de la teoría reducida T_2, tenemos un caso de reducción nageliana o nageliana aproximativa. Un ejemplo de este tipo de reducción es la reducción de las leyes de Galileo a las leyes newtonianas, de las que hablamos antes. Ahora, si la teoría modificada existe, pero no puede derivarse (deducirse) de la teoría reductora, por ejemplo, porque las dos teorías son inconsistentes, entonces se puede tener una reducción que no corresponde ni a la nageliana, ni al modelo de reducción de Schaffner. Como discutiremos en la Sección 6, la reducción parcial de la mecánica newtoniana a la teoría general de la relatividad y la reducción parcial de mecánica Newtoniana a la mecánica cuántica en el límite clásico $\hbar \rightarrow 0$, son buenos ejemplos de esto último.

6. Teoría de Nickles

En contraste con Nagel y Schaffner, Nickles (1973) rechaza la idea de que existe un único modelo de reducción que sea apto de capturar la estructura lógica de reducción en la ciencia.

> En este artículo rechazo la visión generalizada de que la reducción de teorías científicas son todas de un tipo básico. Estoy de acuerdo con quienes sostienen que la reducción interteórica implica la relación de una teoría con su caso especial, pero deseo destacar de cuántas maneras diferentes una teoría puede constituir un caso especial de otra. (Nickles, 1973, p. 181)

En su análisis, Nickles distingue entre dos diferentes modelos de reducción adscritos a diferentes funciones o propósitos científicos: la *reducción*$_1$, que corresponde al modelo nageliano de reducción, y la *reducción*$_2$, que consiste en la reconstrucción de una teoría desde otra mediante la aplicación de una serie de operaciones limitantes u otras transformaciones apropiadas. De acuerdo a su perspectiva, mientras la *reducción*$_1$ equivale a la *explicación* de una teoría por medio de otra y a la *economía ontológica*, la *reducción*$_2$ tiene un rol *heurístico* y *justificativo*. Heurístico en el sentido en que ayuda a la construcción de la nueva teoría y justificativo en el sentido que ayuda a explicar por qué la teoría previa era exitosa. Para él, los diferentes modelos también son asociados a diferentes tipos de reducción, mientras la *reducción*$_1$ sirve para explicar "las reducciones que combinan dominios", en las que hay dos diferentes teorías que describen la misma gama de fenómenos en diferentes niveles de descripción, la *reducción*$_2$ sirve para dar cuenta de las reducciones "preservadoras de dominio", en las que una teoría es sucesora de otra.[11]

Aunque estoy de acuerdo con la opinión de Nickles en que hay diferentes modelos de reducción, que pueden ser asociados con distintos objetivos epistémicos u ontológicos, estoy en desacuerdo con varios aspectos de su enfoque. Primero que todo, estoy en desacuerdo con su generalización de la *reducción*$_1$, en la que el modelo de Shaffner es presentado como una versión revisada del modelo nageliano y, por lo tanto, como un caso especial de la *reducción*$_1$. Como hemos visto anteriormente, el modelo nageliano y el modelo de Schaffner tienen diferentes objetivos epistémicos y, de esta manera, se consideran como dos modelos de reducción diferentes. Segundo, estoy en desacuerdo con la idea que la *reducción*$_1$ y la *reducción*$_2$ sirven para explicar diferentes tipos de reducción asociadas a objetivos específicos. Como argumentaré más adelante, muchos casos de reducción en física combinan estos dos modelos de reducción, lo cual sugiere que la distinción entre la *reducción*$_1$ y *reducción*$_2$ y su vinculación a funciones específicas es menos tajante de lo que Nickles propuso.

Ya que he tratado el modelo nageliano en las secciones previas, ahora me concentraré en la noción de *reducción*$_2$ de Nickles. Nickles caracteriza la *reducción*$_2$ de la siguiente manera:

---

[11] Las reducciones que combinan dominios y preservadoras de dominio a veces se entienden con los términos de "reducciones sincrónicas" y "diacrónicas", respectivamente (Dizadji-Bahmani *et al.*, 2010).

> *Reducción$_2$*: Sea O_i un conjunto de operaciones interteóricas, entonces una teoría T_2 *reduce$_2$* a otra T_1 si y solo si $O_i(T_1) \rightarrow T_2$, donde la flecha representa una "derivación matemática", entendida en un sentido amplio, incluyendo no solo deducción lógica, sino también operaciones limitantes y aproximaciones de muchos tipos. (Nickles, 1973, p. 197)

Ahora bien, como señala Palacios (2019), uno debe notar que las operaciones matemáticas, como límites y otras aproximaciones no se desempeñan en la teoría en sí misma, sino en funciones (o ecuaciones) que representan magnitudes físicas. Por lo tanto, un esquema más preciso necesita ser formulado en términos de magnitudes pertinentes y no directamente en las teorías para ser comparado. Más aún, como Nickles mismo reconoce, para que la *reducción$_2$* se mantenga, es necesario que las operaciones matemáticas desarrolladas en T_1 tengan sentido físico. Aunque él no es explícito acerca de lo que entiende por "sentido físico", se puede interpretar que esta limitación quiere decir que, después de aplicar un conjunto de operaciones matemáticas en T_1, la teoría (límite) resultante, llamémosla T_1*, puede seguir describiendo un comportamiento realista. Llevar el límite de una constante de la naturaleza a cero, por ejemplo, puede resultar en una teoría (límite) que no da cuenta de un comportamiento realista, a menos que este límite sea adecuadamente explicado. De manera similar, llevar el límite de un parámetro tal como la temperatura o el número de partículas al infinito también puede ser ilegítimo si estos límites no son justificados adecuadamente. Así, una caracterización más precisa de la *reducción$_2$*, sugerida por Palacios (2019), es la siguiente:

> *Reducción$_2$**: Dado un conjunto de operaciones interteóricas O_i, una cantidad Q_1 de T_1 *reduce$_2$** otra cantidad Q_1* de T_1* si y solo si (i) $O_i(Q_1)=Q_1$* y (ii) las operaciones matemáticas O_i tienen sentido físico.

Un caso especial de *reducción$_2$* es la reducción limitante, que se refiere a situaciones en que las transformaciones corresponden a límites matemáticos. Siguiendo a Palacios (2019), podemos expresar la reducción limitante de la siguiente manera:

> *Reducción limitante*: Sea Q^1 una cantidad relevante de T_1, Q_1* una cantidad relevante de T_2, entonces una cantidad Q_1* de T_1* *limitante*, *reduce* a una cantidad correspondiente Q^1 de T_1 si y solo si (i) $\lim_{x \rightarrow y} Q_x^{1} = Q_1$* (donde x representa un parámetro que aparece en T_1) y (ii) la operación limitante tiene sentido físico.

Si entendemos *reducción$_2$** como una reducción entre funciones o ecuaciones que representan cantidades físicas, entonces está claro que la *reducción$_2$** puede ser combinada con otros modelos de reducción, tales como el nageliano o el modelo de Schaffner para lograr la reducción (parcial) de una teoría a otra. Curiosamente, Nickles reconoce esto y dice explícitamente que en algunos casos la *reducción$_2$* puede ayudar a aclarar la relación análoga entre T_2 y T_2* en el modelo Schaffner:

> No hay razón para creer que las *reducciones*$_2$ pueden hacerse cargo del trabajo de relación análoga de Schaffner en todos los casos, pero cuando pueden, tendremos T_1 *reduciendo*$_1$ T_2 aproximativamente mediante la *reducción*$_1$ de T_2*, la que a su vez *reduce*$_2$ a T_2. (p. 195)

Ahora llevaré esta idea más allá y argumentaré que, en muchos casos, la *reducción*$_1$ y *reducción*$_2$ pueden ser combinadas para lograr los mismos objetivos epistémicos y que la *reducción*$_2$ puede jugar un rol crucial no solo en la explicación de la relación análoga entre T_2 y T_2*, sino que también en la elección de suposiciones auxiliares que ayuden a lograr la reducción (Nageliana) de una teoría a otra.

Un buen ejemplo que ilustra que la *reducción*$_1$ y la *reducción*$_2$ se pueden combinar para cumplir las mismas funciones epistémicas es el caso de las transiciones de fases, mencionadas en la sección previa. Las transiciones de fase de primer orden son definidas como discontinuidades en la primera derivada de la energía libre. En mecánica estadística, la energía libre es dada por la siguiente expresión:

$$F\,(Kn) = -kBT\,lnZ\,, \tag{2}$$

donde K_n es el conjunto de las constantes de acoplamiento, k_B es la constante de Boltzmann, T es la temperatura, y Z es función de partición canónica, definida como la suma de todas las configuraciones posibles:

$$Z = \Sigma_i e^H i \tag{3}$$

Ya que la Hamiltoniana H usualmente es una función no-singular de los grados de libertad, se deduce que la función partitiva, que depende de la Hamiltoniana, es la suma de las funciones analíticas. Esto significa que ni la energía libre, entendida como el logaritmo de la función partitiva, ni sus derivadas, pueden tener las discontinuidades que caracterizan las transiciones de fase de primer orden en termodinámica. Llevando el límite termodinámico $N \rightarrow \infty$, $V \rightarrow \infty$ en la ecuación (3) permite recuperar las discontinuidades en las derivadas de la energía libre y, por lo tanto, permite derivar el tratamiento termodinámico de las transiciones de fase. En resumen, lo que hacen las aproximaciones más importantes a las transiciones de fase es tomar el límite de una cantidad dada Q, es decir, la energía libre, para reproducir los valores de las cantidades correspondientes en la teoría límite T_1*, en la que $N=\infty$. En otras palabras, se prueba que los valores de las derivadas de la energía libre en la mecánica estadística finita SM converge hacia los valores de las cantidades correspondientes, evaluadas en la mecánica estadística infinita SM_∞, de manera que:

$$\lim_{N \to \infty} Q_N^{SM} = Q^{SM_\infty}.$$

Dado que las singularidades en las derivadas de la energía libre son obtenidas exitosamente en la teoría límite SM_∞, se pueden construir leyes puente que relacionen las derivadas termodinámicas de la energía libre con las cantidades correspondientes en la "mecánica estadística infinita" y se *deduce* el tratamiento termodinámico de las transiciones de fases (Butterfield, 2011b; Palacios, 2019). En resumen, la reducción de las transiciones de fase de primer orden a la mecánica estadística implica los siguientes pasos básicos: i) Una *reducción limitante* entre las cantidades relevantes de T_1 (i.e. SM) y $T_1{}^*$ (i.e. SM_∞) mediante el uso del límite termodinámico. ii) El uso de leyes puente que relacionen las derivadas de la termodinámica de la energía libre con las cantidades correspondientes en la mecánica estadística finita. iii) Una reducción nageliana entre $T_1{}^*$ y T_2 (el tratamiento termodinámico de las transiciones de fase) con la ayuda de leyes puente y suposiciones auxiliares (por ejemplo, la estructura reticular, un tipo particular de grados de libertad, rangos de valores de grados de libertad, etc.).[12] De forma similar, creo que el intento de reducir la Segunda Ley a la mecánica estadística mediante el uso del límite termodinámico también puede ser considerado como un caso que combina tanto la reducción limitante como la reducción nageliana. Crowther (2019) ofrece un análisis interesante de los esfuerzos por reducir la relatividad general y la teoría cuántica de campos a la gravedad cuántica, y sugiere que este es un caso que, potencialmente, combina la reducción nageliana con el concepto de *reducción*$_2$ de Nickles.

Es importante destacar que, en el ejemplo anterior, la *reducción limitante*, que para Nickles corresponde a la *reducción*$_2$, desempeña un papel en lo que él llama reducciones de "combinación de dominios", mediante las que dos diferentes teorías describen el mismo rango de fenómenos en diferentes niveles de descripción. Esto significa —en contra de lo que Nickles sugiere— que la *reducción*$_2$ no se restringe a las reducciones denominadas "preservantes de dominio", ni tiene un rol meramente heurístico y justificador. De hecho, se puede interpretar que la reducción del tratamiento termodinámico de las transiciones de fase a la mecánica estadística tiene un objetivo ontológico, en el sentido de que esto puede sugerir que las transiciones de fase no son nada más allá que el resultado del comportamiento atómico, y también se puede interpretar que tiene un rol explicativo, debido a que tiene el potencial de explicar el comportamiento termodinámico de las transiciones de fase desde la perspectiva de la mecánica estadística.

También se debería destacar que, en el caso de las transiciones de fase, el límite termodinámico, es decir, la reducción limitante, ayuda a derivar el tratamiento exacto de las transiciones de fase. Esto significa que dicha reducción no lleva a la modificación de la teoría de transiciones de fase y, por lo tanto, no se puede abarcar por el modelo Schaffner. Curiosamente, las aproximaciones finitas a las transiciones de fase que no recurren al límite

[12] La reducción de transiciones de fase sigue siendo un asunto controversial en la literatura filosófica. Batterman (2001), por ejemplo, ha argumentado en contra de la reducción de transiciones de fase señalando la naturaleza "singular" del límite termodinámico. Butterfield (2011b), Norton (2011), Palacios (2019), entre otros, han contestado a estos argumentos sugiriendo que la "naturaleza singular" del límite termodinámico no es compatible con la reducción de transiciones de fase a la mecánica estadística.

termodinámico (Gross, 2001b) permiten derivar una teoría alternativa de transiciones de fase para casos de estudio específicos (sistemas no extensivos). Esta reducción parece encajar bien con el modelo Schaffner. En otras palabras, en el caso de las transiciones de fase, los científicos parecen tener la opción de derivar el tratamiento termodinámico original de transiciones de fase mediante la combinación de reducción limitante y la reducción nageliana, o derivar una teoría de transiciones de fase alternativa que corrige el tratamiento termodinámico sin aplicar el límite termodinámico, i.e. sin usar reducción limitante. Este último caso es un buen candidato para la reducción de Schaffner.

Una pregunta que se plantea es si la *reducción*$_2$ siempre debe combinarse con la reducción nageliana, en otras palabras, si la *reducción*$_2$ siempre desempeña el rol de enderezar los supuestos que permiten derivar la teoría original T_2. Aunque, en los casos examinados antes, este parece ser el papel de la reducción limitante, no hay razón para pensar que el papel de la reducción limitante está restringido a arreglar los supuestos que permiten la reducción de Nagel. De hecho, como señaló Nickles, en algunos casos, la reducción limitante, o más generalmente, la *reducción*$_2$, puede ser útil para precisar la noción de analogía fuerte. Por ejemplo, la *reducción*$_2$ puede ayudar indirectamente a entender la relación entre T_2 y T_2*, al ofrecer una definición precisa de "proximidad". En efecto, una comparación cuantitativa entre los valores de las cantidades Q_1 evaluadas en la teoría finita T_1 y los valores de las correspondientes cantidades Q_1*, evaluadas en la teoría limitada T_1*, puede, en algunos casos, darnos información en torno a qué tan cerca están los valores de las cantidades relevantes en la teoría que puede ser derivada desde T_1, es decir T_2*, a los valores de las cantidades correspondientes en la teoría original T_2. Por ejemplo, en el caso de las transiciones de fase, si los valores de las cantidades evaluadas en la mecánica estadística finita son cercanos a los valores de las magnitudes correspondientes en la mecánica estadística infinita $Q^{SM} \approx Q^{SM\infty}$, podemos inferir que los valores de las cantidades Q^{TD^*} en la teoría termodinámica modificada *TD**, que puede ser derivada desde *SM*, son también cercanos a los valores de las cantidades evaluadas en la teoría termodinámica original de las transiciones de fase *TD*. En este sentido particular de aproximación numérica, la *reducción*$_2$ puede ser útil para entender la relación fuertemente análoga entre T_2 y T_2*.

Pero también se debe tener en cuenta la posibilidad de obtener una *reducción*$_2$ incluso en casos donde la reducción nageliana y la de Schaffner fallen. Como señala Nickles, solo raras veces todas las ecuaciones de una teoría T_2 serán reducidas a las ecuaciones de T_1 y solo raramente una teoría completa se reduce a otra. En la mayoría de los casos se consigue una reducción *parcial*, en la que T_1 y T_2 representan partes de la teoría. Considero que la *reducción*$_2$ puede ser especialmente útil en casos de reducción parcial. Un buen candidato para la *reducción*$_2$ es la reducción parcial de la mecánica clásica a la teoría general de la relatividad. Fletcher (2019) ha ofrecido un análisis detallado de esta reducción y ha sugerido que la reducción parcial de la mecánica clásica a la relatividad general no es el resultado de una derivación lógica de la teoría general de la relatividad a partir de la mecánica clásica, sino más bien de dar una interpretación específica de la operación límite $c \rightarrow \infty$ que satisface la demanda explicativa de las reducciones interteóricas. Otro ejemplo (aunque admito que es un ejemplo polémico) es la reducción *parcial* de la mecánica clásica a la mecánica cuántica en el límite clásico $\hbar \rightarrow 0$. Feinzeig (2020) ha argumentado que dar una cierta interpretación del límite $\hbar \rightarrow 0$ permite mostrar que las predicciones de los valores esperados dadas por la mecánica cuántica son, en muchos casos, "cercanos" a las predicciones correspondientes en la física clásica. En este caso no hay deducción lógica de la teoría corregida a partir de la teoría reductora, pero se puede seguir utilizando esta relación limitante para explicar por qué las predicciones de la mecánica clásica son casi exactas en muchos sistemas. Una ventaja de la *reducción*$_2$ es que no necesita que la teoría corregida T_2^* sea derivable (es decir, lógicamente deducible) desde T_1 y, en este sentido, sirve para dar cuenta de muchos casos de reducción en los que la deducción lógica no parece jugar un papel importante.

Para resumir, de acuerdo a Nickles (1973), he argumentado en esta sección que la *reducción*$_2$ debe distinguirse de otros modelos de reducción, como el modelo nageliano o el modelo de Schaffner. Sin embargo, en oposición a Nickles, tengo que señalar que no hay ningún objetivo o funciones epistémicas específicas asociadas a la *reducción*$_2$. De hecho, en algunos casos, la *reducción*$_2$ puede ser usada para fortalecer las suposiciones que permiten (aproximadamente) la reducción nageliana y de esta manera, puede ayudar a obtener una reducción que apunte a la consolidación de la teoría reductora, o la explicación de la teoría reducida. En otros casos, puede ayudar a precisar la relación análoga entre T_2 y T_2^* en las reducciones tipo Schaffner. Pero, en otros casos, puede ayudar a explicar reducciones parciales que apuntan a la justificación de los éxitos de la teoría reducida T_2, incluso en casos que la nageliana y la de Schaffner fallan.

7. El modelo de reducción estructuralista

Existe otro modelo de reducción interteórica, que por alguna razón ha sido ampliamente ignorado en el debate angloamericano. Se trata del modelo de Balzer, Moulines y Sneed (1987), que forma parte del llamado programa estructuralista y se caracteriza por el uso de predicados conjunto-teóricos expresados de manera informal ("informal" en el sentido de que no se emplea lengua formal). Este modelo tiene la ventaja de dar una reconstrucción precisa de las relaciones interteóricas y ofrecer una noción precisa de la aproximación interteórica. Sin entrar en demasiados detalles, la noción estructuralista de reducción puede ser caracterizada de la siguiente manera (Moulines, 2006): Decir que un dominio C se reduce a un dominio D es decir que es decir que una teoría T_c tiene un *link ontológico reductivo* hacia la teoría T_D, donde "link ontológico reductivo es un tipo de relación interteórica. Más precisamente, cada teoría es determinada por una clase de modelos M, cada uno de los cuales tiene una estructura particular y satisface el mismo conjunto de axiomas. Aunque hay distintas versiones de las relaciones reductivas en el enfoque estructuralista, la idea principal del programa estructuralista se puede resumir de la siguiente manera (Moulines, 2006):

A es reducible a *B1, …, BN,* sí y sólo existen teorías *T* y *T',* tal que:

- *A* aparece como dominio básico de los modelos de *T*;
- análogamente Bi con respecto a *T'*;
- el campo de experiencia *F* subsumido por *T* (el campo de aplicación de *T* en el que estamos interesados) es un subcampo del campo correspondiente a *T'*;
- hay un link ontológico reductivo que va desde *T* a *T'* y relaciona A con Bi;
- *T* es nomológicamente reducible a *T'*.

De acuerdo con este enfoque, hay un link ontológico reductive desde A hacia Bi, si A "se obtiene a partir de "Bi"" al aplicar sucesivamente operaciones de teoría de conjuntos, tales como productos cartesianos. La reducibilidad nomológica significa que aquellos modelos de *T* que subsumen el campo de experiencia *F* están correlacionados (a través del link ontológico reductive) a los modelos de especialización reales de *T'* (estructuras que satisfacen las leyes fundamentales de *T'*). En particular, modelos que subsumen el mismo campo de experiencia que en *T*.

Una ventaja importante del programa estructuralista es que abre la posibilidad de discutir asuntos de analogía fuerte y reducción aproximativa en un nivel menos informal que otros modelos de reducción y, en este sentido, tiene el potencial de mejorar modelo aproximativo nageliano y el modelo de *reducción*$_2$ de Nickles. Sin embargo, el problema se desplaza a la tarea de demostrar que algunos casos importantes de reducción encajan en este modelo. Aunque el modelo ha conducido a reconstrucciones detalladas de ejemplos particulares de reducción en física, tales como la reducción de la mecánica de cuerpos rígidos a la mecánica de partículas newtoniana (Sneed, 1971) y la teoría planetaria de Kepler a la mecánica de partículas newtoniana (Moulines, 1980), no está del todo claro si todas las reducciones relevantes en física se pueden reconstruir de esta manera.

Otro problema de la reducción estructuralista es que las reducciones solo se pueden realizar a posteriori, lo que significa que este tipo de reducción no puede desempeñar un rol heurístico en la construcción de teorías reductoras. Sin embargo, esto no significa que este enfoque sea inútil, puesto que una reconstrucción apropiada de la reducción, en este sentido, tiene el potencial de ayudar a especificar las relaciones de aproximación entre la teoría reducida y la reductora y, con esto, dar una justificación sólida para el éxito estimativo de la teoría reducida. De hecho, este modelo ha inspirado análisis reductivos recientes en torno a casos específicos de reducción en física que describiremos en la próxima sección.

8. Enfoques contemporáneos

El programa estructuralista y el concepto de reducción de límite de Nickles inspiraron enfoques topológicos de reducción (p. ej., Schech, 2013; Fletcher, 2016; 2020). El objetivo de este tipo de reducción es, principalmente, hacer más precisa la noción de aproximación que está presente en las reducciones de límite. En otras palabras, se pretende hacer más explícito el sentido en el que la teoría reducida aproxima la teoría reductora. Un enfoque similar ha sido desarrollado por Landsmann (2006; 2017) y Feinzeig (2020; 2022), quienes se han enfocado principalmente en la reducción de la teoría clásica a la teoría cuántica en el límite clásico.

La literatura contemporánea en filosofía de la física también ha mejorado nuestro entendimiento de algunos aspectos básicos de reducción interteórica. Contrario a muchas teorías de reducción, que afirman que la reducción interteórica es una derivación "global" de una teoría a otra, Rosaler (2015) afirma que las reducciones en física tienen un carácter "local". En esta forma débil de reducción interteórica, la relación reductiva no es entre teorías completas, sino más bien entre modelos de un sistema. Más aún, Rosaler (2019) también ha afirmado que las reducciones en física se tienen que interpretar como relaciones *a posteriori*. Esto significa que la reducción no depende solo de la relación estructural entre las teorías que se comparan, sino también de hechos empíricos acerca de cuándo las teorías tienen éxito al describir sistemas reales. En este sentido, la reducción se entiende como una relación *a posteriori*.

9. Conclusión: Un enfoque pluralista de reducción

En este artículo he defendido un enfoque pluralista de reducción, en el que la reducción no se entiende en términos de un único "modelo generalizado" filosófico, sino más bien como una familia de modelos de reducción interteórica que puede ayudar a alcanzar ciertas metas epistémicas y ontológicas. Mediante el análisis de casos históricos de reducción en física, he distinguido entre seis funciones diferentes de la reducción: *explicación*, *justificación* y *corrección* de la teoría reducida, así como el *desarrollo*, *consolidación* y *fundamentalidad* relativa de la teoría reductora. También he argumentado que no todos los casos de reducción en física persiguen los mismos objetivos. De hecho, he sugerido que hay compensaciones interesantes entre algunos de los objetivos asociados típicamente con la reducción. Más concretamente, he propuesto que hay un equilibrio entre la corrección de la teoría reducida y la consolidación de la teoría reductora. Así, considero que el modelo de reducción que mejor se ajuste a un caso de estudio particular depende de los objetivos específicos que subyacen a la reducción pretendida. Por ejemplo, casos en los que el principal objetivo es consolidar la teoría reductora en lugar de modificar la teoría reducida, pueden encajar mejor con el modelo nageliano. Por otro lado, casos que buscan corregir la teoría secundaria a partir de la teoría reductora pueden encajar mejor con el modelo de reducción de Schaffner. También he argumentado que hay casos en los que, para lograr los objetivos de la reducción pretendida, es necesario combinar el modelo nageliano o el de Schaffner con otros modelos de reducción que dan una noción más precisa de aproximación, tal como el modelo de *reducción*$_2$ de Nickles y el enfoque estructuralista.

Afortunadamente, los filósofos de la ciencia nos presentan una serie de notables modelos de reducción (que de ninguna manera se limitan a los modelos que he comentado aquí), los que nos ayudan a entender la naturaleza de los casos más importantes de reducción en física. Definir reducción siguiendo un único modelo de reducción, como el modelo nageliano, hace que el término "reducción" sea demasiado restrictivo e incapaz de explicar casos que satisfacen los objetivos epistémicos y ontológicos más importantes del programa científico reductivo. Una consecuencia de esto es que algunos casos exitosos de reducción pueden ser erróneamente clasificados como casos de "emergencia" o como fracasos en la reducción porque no reúnen las condiciones del modelo estándar. Por ejemplo, las transiciones de fase han sido consideradas, a veces, como casos de "emergencia" porque (entre otras razones) el tratamiento termodinámico no puede *deducirse* desde la mecánica estadística finita (p. ej., Batterman, 2001; Anderson, 1972). Tener un mejor entendimiento de la reducción que nos permita explicar programas reductivos exitosos en física es importante, no por cuestiones de nomenclatura, sino porque nos dan un mejor entendimiento de las relaciones entre diferentes teorías.

Referencias

Anderson, P. W. (1972). More is different. *Science*, *177*(4047), 393–396.

Balzer, W., Moulines, C. U., & Sneed, J. D. (1987). *An architectonic for science: The structuralist program*. Springer Science & Business Media.

Batterman, R. W. (2001). *The devil in the details: Asymptotic reasoning in explanation, reduction, and emergence.* Oxford University Press.

Blackmore, J. T. (1995). *Ludwig Boltzmann: His Later Life and Philosophy, 1900-1906: Book Two: The Philosopher*. Springer Science & Business Media.

Boltzmann, L. (1877). *Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze des mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung, respective den Sätzen über das Wärmegleichgewicht*. Sitzungsbericht der Akadamie der Wissenschaften, Wien, II, 67–73.

Boltzmann, L. (1885). Über die möglichkeit der begründung einer kinetischen gastheorie auf anziehende kräfte allein. *Annalen der Physik*, *260*(1), 37–44.

Brush, S. G. (2006). Ludwig Boltzmann and the foundations of natural science. En I.M. Fasol-Boltzmann & G.L. Fasol (Eds.), *Ludwig Boltzmann (1844–1906)* (pp. 65–80). Springer.

Butterfield, J. (2011a). Emergence, reduction and supervenience: A varied landscape. *Foundations of Physics*, *41*(6), 920–959. https://doi.org/10.1007/s10701-011-9549-0

Butterfield, J. (2011). Less is different: emergence and reduction reconciled. *Foundations of Physics*, *41*(6), 1065-1135. https://doi.org/10.1007/s10701-010-9516-1

Callen, H. B., & Kestin, J. (1960). An Introduction to the Physical Theories of Equilibrium Thermostatics and Irreversible Thermodynamics. *Journal of Applied Mechanics*, *27*(3), 599-600. https://doi.org/10.1115/1.3644060

Casetti, L., & Kastner, M. (2006). Nonanalyticities of Entropy Functions of Finite and Infinite Systems. *Physical Review Letters*, *97*(10), 100602. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.100602

Dauxois, T., Latora, V., Rapisarda, A., Ruffo, S., & Torcini, A. (2002). The Hamiltonian Mean Field Model: From Dynamics to Statistical Mechanics and Back. En T. Dauxois, S. Ruffo, E. Arimondo, & M. Wilkens (Eds.), *Dynamics and Thermodynamics of Systems with Long-Range Interactions* (pp. 458-487). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-45835-2_16

Dizadji-Bahmani, F., Frigg, R., & Hartmann, S. (2010). Who's Afraid of Nagelian Reduction? *Erkenntnis*, *73*(3), 393-412. https://doi.org/10.1007/s10670-010-9239-x

Einstein, A. (1910). Theorie der opaleszenz von homogenen flüssigkeiten und flüssigkeitsgeminschen in der nähe des kritischen zustandes. *Annalen der Physik*, *338*(16), 1275–1298.

Feinzeig, B. H. (2020). The classical limit as an approximation. *Philosophy of Science* (*forthcoming*).

Feintzeig, B. H. (2022). Reductive Explanation and the Construction of Quantum Theories. *The British Journal for the Philosophy of Science*, *73*(2), 457-486. https://doi.org/10.1093/bjps/axz051

Feyerabend, P. K. (1962). Explanation, reduction, and empiricism.

Fletcher, S. C. (2016). Similarity, topology and physical significance in relativity theory. *The British Journal for the Philosophy of Science*, *67*(2), 365-389.

Fletcher, S. C. (2019). On The Reduction of General Relativity to Newtonian Gravitation. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, *68*, 1–15. https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2019.04.005

Fletcher, S. C. (2020). Similarity Structure and Emergent Properties. *Philosophy of Science*, *87*(2), 281-301. https://doi.org/10.1086/707563

Frigg, R. (2008). A Field Guide to Recent Work on the Foundations of Statistical Mechanics. En D. Rickles (Ed.), *The Ashgate Companion to Contemporary Philosophy of Physics* (pp. 99-196). Ashgate.

Greene, R. F. & Callen, H. B. (1951). On the formalism of thermodynamic fluctuation theory. *Physical Review*, *83*(6), 1231.

Gross, D. (2001a). Second law of thermodynamics, macroscopic observables within boltzmann's principle but without thermodynamic limit.

Gross, D. H. (2001b). *Microcanonical thermodynamics: phase transitions in "small" systems*. World Scientific.

Gross, D. H. E. (2002). Thermo-statistics or Topology of the Microcanonical Entropy Surface. En T. Dauxois, S. Ruffo, E. Arimondo, & M. Wilkens (Eds.), *Dynamics and Thermodynamics of Systems with Long-Range Interactions* (pp. 23-44). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-45835-2_2

Kemeny, J. G. & P. Oppenheim (1956). On reduction. *Philosophical Studies: An International Journal for Philosophy in the Analytic Tradition*, *7*(1/2), 6–19.

Kim, J. (1998). *Mind in a Physical World: An Essay on the Mind-Body Problem and Mental Causation*. MIT press.

Kitcher, P. (1984). 1953 and all that. A tale of two sciences. *The Philosophical Review*, *93*(3), 335–373.

Klein, M. J. (1973). The Development of Boltzmann's Statistical Ideas. En E. G. D. Cohen & W. Thirring (Eds.), *The Boltzmann Equation* (pp. 53-106). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-8336-6_4

Landsman, N. P. (2006). Between classical and quantum. En J. Butterfield & J. Earman (Eds.), *Handbook of the Philosophy of Science* (pp. 417-553). Elsevier.

Landsman, K. (2017). *Foundations of Quantum Theory: From Classical Concepts to Operator Algebras*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51777-3

Loschmidt, J. (1876). Über den Zustand des Wärmegleichgewichtes eines Systems von Körpern. *Akademie der Wissenschaften, Wien. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse, Sitzungsberichte*, *73*, 128–135.

Mainwood, P. (2006). *Phase transitions in finite systems*. [Ph. D. thesis]. University of Oxford.

Mishin, Y. (2015). Thermodynamic theory of equilibrium fluctuations. *Annals of Physics*, *363*, 48–97.

Moulines, C. U. (1980). Intertheoretic Approximation: The Kepler-Newton Case. *Synthese*, *45*(3), 387–412.

Moulines, C. U. (1984). Ontological Reduction in the Natural Sciences (1). En W. Balzer, D. A. Pearce, & H.-J. Schmidt (Eds.), *Reduction in Science* (pp. 51-70). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-009-6454-9_5

Nagel, E. (1949). The meaning of reduction in the natural sciences. En R. Stauffer (Ed.), *Science and Civilization*.

Nagel, E. (1961). *The structure of science: Problems in the logic of scientific explanation*. Hackett.

Nagel, E. (1970). Issues in the logic of reductive explanations. En H. K. Munitz (Ed.), *Mind, science and history* (pp. 117–137). SUNY Press.

Nickles, T. (1973). Two Concepts of Intertheoretic Reduction. *The Journal of Philosophy*, *70*(7), 181–201.

Palacios, P. (2019). Phase Transitions: A Challenge for Intertheoretic Reduction? *Philosophy of Science*, *86*(4), 612–640. https://doi.org/10.1086/704974

Poincaré, H. (1889). Sur les tentatives d'explication m'ecanique des principes de la thermodynamique. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences*, *108*, 550–553.

Rau, J. (2017). *Statistical physics and thermodynamics: an introduction to key concepts*. Oxford University Press.

Rosaler, J. (2015). Local reduction in physics. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, *50*, 54-69.

Rosaler, J. (2019). Reduction as an *a posteriori* Relation. *The British Journal for the Philosophy of Science*, *70*(1), 269-299. https://doi.org/10.1093/bjps/axx026

Sarkar, S. (2015). Nagel on reduction. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, *53*, 43–56.

Schaffner, K. F. (1967). Approaches to reduction. *Philosophy of Science*, *34*(2), 137–147.

Schaffner, K. F. (1977). Reduction, reductionism, values, and progress in the biomedical sciences. *Logic, laws, and life*, *6*, 143–171.

Schaffner, K. F. (2012). Ernest Nagel and reduction. *The Journal of Philosophy*, *109*(8/9), 534–565.

Scheibe, E. (1997). *Die Reduktion physikalischer Theorien: Ein Beitrag zur Einheit der Physik*. Springer.

Shech, E. (2013). What Is the Paradox of Phase Transitions? *Philosophy of Science*, *80*(5), 1170-1181. https://doi.org/10.1086/674000

Sklar, L. (1995). *Philosophical Issues in the Foundations of Statistical Mechanics*. Cambridge University Press.

Sneed, J. D. (1971). *The logical structure of mathematical physics*. Dordrecht.

Suppe, F. (1974). *The structure of scientific theories*. University of Illinois Press.

Tisza, L. & Quay, P. M. (1963). The statistical thermodynamics of equilibrium. *Annals of Physics*, *25*(1), 48–90.

Torretti, R. (1990). *Creative Understanding*. University of Chicago Press.

Van Riel, R. (2011). Nagelian Reduction beyond the Nagel Model. *Philosophy of Science*, *78*(3), 353-375. https://doi.org/10.1086/660300

Worrall, J. (1989). Structural realism: The best of both worlds? *Dialectica*, *43*(1-2), 99 124.

Zermelo, E. (1896). Ueber mechanische Erklärungen irreversibler Vorgänge. Eine Antwort auf Hrn. Boltzmann's “Entgegnung”. *Annalen der Physik*, *295*(12), 793–801.